

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测	陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)
粤港澳大湾区大气PM _{2.5} 浓度的遥感估算模型	代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)
典型输送通道城市冬季PM _{2.5} 污染与传输变化特征	代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)
郑州市夏季PM _{2.5} 中二次无机组分污染特征及其影响因素	和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析	彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 (48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析	陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)
2020年“三连击”台风对我国东部地区O ₃ 污染的影响分析	花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 (71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析	张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)
机动车减排降碳综合评价体系综述	范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景	杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力	翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素	张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价	窦殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评价	张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价	张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 (151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析	姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用	李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因	张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制	陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素	李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素	李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 (218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析	王耕, 张芙蓉 (228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望	田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因	石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究	徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响	崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测	帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 (287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测	石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态	胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 (314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子	申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响	陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征	李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响	薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析	梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展	刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测	解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析	马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)
铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析	李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价	李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应	唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值	胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍芬, 魏世强 (439)
生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复	吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展	马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(<i>Lactuca sativa</i>)生理生态的影响	牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 (470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制	刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响	赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)
微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响	刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测	王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应	郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响	刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征	陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响	梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析	王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征	黄福义, 周曙屹, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 (576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素	刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制	刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)
CO ₂ 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb ²⁺ 吸附性能对比	江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子

申楷慧¹, 魏识广², 李林^{1*}, 储小雪¹, 钟建军², 周景钢², 赵毅¹

(1. 桂林电子科技大学生命与环境科学学院, 桂林 541004; 2. 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 桂林 541006)

摘要: 喀斯特森林生态系统脆弱, 为了探明漓江流域喀斯特森林土壤的碳储潜力, 揭示漓江流域喀斯特森林土壤有机碳(SOC)的空间分布格局, 探寻各驱动因子对土壤有机碳空间分布的驱动作用途径及贡献, 为评估该区域喀斯特森林的碳循环功能提供科学依据。以漓江流域喀斯特森林土壤为对象, 研究漓江不同流域段(上、中、下游)、不同深度土层的森林土壤有机碳的空间分布特征, 通过相关性分析和构建分段结构方程模型, 揭示漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布的驱动因子及其作用途径, 并量化了各类因子的直接或间接作用比例。结果表明, 漓江流域喀斯特森林土壤整体土层较浅, 土壤有机碳具有表聚性。在不同流域段土壤有机碳含量的分布为: 上游 > 下游 > 中游, 易氧化有机碳(ROC)和可溶性有机碳(DOC)的分布与之相一致, 而微生物碳(MBC)的分布为: 上游 > 中游 > 下游。各类驱动因子对流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布驱动作用途径和贡献不同, 其贡献按从大到小排序为: 土壤理化因子 > 土壤有机碳活性组分 > 样地海拔 > 样地物种多样性, 总效应分别为: 1.148、0.574、0.284和-0.013。其中, 样地海拔对土壤有机碳仅有间接影响, 土壤有机碳活性组分对土壤有机碳仅有直接影响。各驱动因子中, 土壤总氮、土壤易氧化有机碳、样地物种丰富度和土壤可溶性有机碳均可作为漓江流域喀斯特森林土壤有机碳含量变化的重要预测因子。因此, 有必要建立有效的覆盖全漓江流域的生态环境保护机制, 减少并控制人为干扰的影响(特别是漓江中游城市段), 并通过提升和保护流域喀斯特森林的物种多样性, 改善土壤理化性质, 改善并提升土壤有机碳活性组分含量等有效途径, 提升漓江流域喀斯特森林土壤有机碳储量, 促进区域森林碳汇功能的提升。

关键词: 喀斯特森林; 土壤有机碳; 有机碳活性组分; 漓江流域; 结构方程模型(SEM)

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0323-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202211142

Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors

SHEN Kai-hui¹, WEI Shi-guang², LI Lin^{1*}, CHU Xiao-xue¹, ZHONG Jian-jun², ZHOU Jing-gang², ZHAO Yi¹

(1. School of Life & Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China)

Abstract: The aim of this study was to explore the carbon storage potential of karst forest soils in the Lijiang River Basin, reveal the spatial pattern of soil organic carbon (SOC), investigate the contributions and pathways of each driving factor to the spatial distribution of soil organic carbon, and provide a scientific basis for assessing the carbon cycle function of karst forests in the region. We employed structural equation modeling (SEM) and correlation analysis to investigate the spatial distribution characteristics of forest soil organic carbon in different basin sections (upper, middle, and lower reaches) and soil layers at different depths of the Lijiang River. Additionally, the direct and indirect ratios of each factor were quantified. The results showed that the overall soil layer of karst forest soils in the Lijiang River Basin was shallow, and soil organic carbon was phenoconcentric. The distribution of soil organic carbon content in different watershed sections was upstream > downstream > midstream, and the distribution of readily oxidizable carbon (ROC) and dissolved organic carbon (DOC) was consistent, whereas the distribution of microbial biomass carbon (MBC) was upstream > midstream > downstream. The contribution of various biotic and abiotic factors to the spatial distribution of soil organic carbon in karst forests in the watershed was different, and their contributions were ranked in descending order as: soil physicochemical factors > soil organic carbon active fraction > sample elevation > sample species diversity, with the total effects of 1.148, 0.574, 0.284, and -0.013, respectively. Among them, the sample site elevation had only an indirect effect on soil organic carbon, and the soil organic carbon active fraction had only a direct effect on soil organic carbon. Among the driving factors, total soil nitrogen, soil oxidizable organic carbon, sample site species richness, and soil soluble organic carbon could be used as important predictors of soil organic carbon content in karst forests in the Lijiang River Basin. Therefore, it is necessary to establish an effective eco-environmental protection mechanism covering the whole Lijiang River Basin, to reduce and control the impact of anthropogenic disturbances (especially in the middle urban section of the Lijiang River Basin), and to enhance and protect the species diversity of karst forests in the basin in order to improve soil physicochemical properties, improve and enhance the content of the soil organic carbon active fraction, and enhance the soil organic carbon stocks of karst forests in the Lijiang River Basin through other effective ways, as well as to promote the enhancement of the regional forest carbon sink function.

Key words: karst forest; soil organic carbon; organic carbon active fraction; the Lijiang River Basin; structural equation modeling(SEM)

收稿日期: 2022-11-13; 修订日期: 2023-03-08

基金项目: 广西自然科学基金项目(2020GXNSFAA159108, 2022GXNSFAA035583); 国家自然科学基金项目(32060305); 广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2021KY0206)

作者简介: 申楷慧(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤有机碳, E-mail: skh879666860@163.com

* 通信作者, E-mail: lilin@guet.edu.cn

我国是CO₂排放大国,人为排放的CO₂近50%都被陆地生态系统所吸收^[1]. 土壤碳库是陆地生态系统碳库中最大的贮库,其中森林土壤碳库占土壤碳库的73%^[2]. 土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)源自于陆地生态系统的长期积累,是森林土壤碳库重要的组成部分^[3,4]. 研究森林土壤有机碳的空间分布及其驱动因子的作用,对评价和保护区域森林的碳汇功能具有重要意义.

我国土壤0~100 cm的有机碳(以C计)储量为(80.68 ± 3.49)Pg,其中43.6%储存在0~20 cm土层中^[5]. 土壤有机碳根据其在土壤中被分解所需时间可分为:活性有机碳(active pool, Co)、缓效性碳(slow pool, Cs)及惰性有机碳(passive pool, Cr)^[6]. 活性有机碳主要包括:可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、微生物碳(microbial biomass carbon, MBC)和易氧化有机碳(readily oxidizable carbon, ROC)^[7]. 活性有机碳对土壤变化极为敏感,可在土壤中快速周转,故被当作评价土壤质量变化的敏感指标^[8,9]. 通常活性有机碳组分占有土壤机碳的比例排序为:易氧化有机碳>可溶性有机碳>微生物碳^[10]. 森林土壤有机碳具有含量高、空间变异性强和随土层深度变化明显的特征^[11].

由于受自然因素和人为因素的影响,土壤有机碳及其活性组分在不同森林土壤中的分布会存在差异^[12~16]. 不同林分的土壤有机碳、可溶性有机碳和微生物碳含量分布均受总氮、总磷等土壤理化因子的显著影响^[15]. 在不同类型森林中,受人为干扰较小的高海拔森林土壤有机碳密度较高^[16]. 此外,土壤碳储量还与森林植物多样性及其生物量碳储量相关^[13,17]. 植被类型是驱动土壤有机碳垂直分布的主导因素^[12],而海拔是通过影响植被的分布和生长影响到土壤有机碳的分布^[14]. 以上对于土壤有机碳空间分布的驱动因子的探究尚在非量化的描述阶段,有必要引入分段结构方程模型,深入研究各类驱动因子的作用途径并量化其各自的贡献.

由于喀斯特地区的地形和地貌特征,导致植被生境条件相对脆弱,造就了喀斯特地区森林具有不同的土壤碳循环特征^[18]. 我国是世界上喀斯特地貌大面积发育的国家之一^[19],近年来对喀斯特地区森林的研究多集中在云贵地区^[20~22]. 云南喀斯特地区土壤有机碳密度高于其全省的平均水平,表层土壤有机碳密度主要受海拔、纬度等环境因子的影响^[21]. 贵州喀斯特地区土壤有机碳在0~50 cm土层呈线性关系递减,有机碳的空间分布受土壤氮、磷和森林物种丰富度的影响较大^[22,23]. 漓江流域位于中国西南典型的喀斯特地区,其两岸的喀斯特景观闻名全球,其

地貌的特点是土层薄、可溶岩大量露头和水文过程快速而频繁^[19],其森林群落对平衡区域碳汇功能作用重大. 为了保护漓江的生态安全并提升其沿岸的喀斯特森林生态系统的功能,需要对其流域喀斯特森林土壤有机碳及其活性组分空间分布格局及其驱动因子进行深入研究.

本研究选取漓江流域典型喀斯特森林,通过野外调查结合室内实验,并引入分段结构方程模型,系统地获取土壤有机碳及其活性组分的空间分布格局及其驱动因子作用,旨在进一步评估和保护漓江流域森林土壤碳储量及生态系统碳循环功能提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

漓江流域(24°18'~25°41'N, 109°45'~110°40'E)位于广西壮族自治区东北部,属于珠江水系,以兴安县华江瑶族乡的猫儿山北侧为起点,至平乐县恭城河口止,干流全长为214 km. 漓江流域属中亚热带湿润季风气候,自上游到下游的降雨量持续减少,年均降雨量为1 814~1 941 mm,3~8月为汛期,9~2月为旱季^[19],是典型的喀斯特溶岩地貌,土被不连续,森林分布不均,具有分段特征.

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集及保存

综合考虑了漓江流域的地形、地貌和植被类型等因素,于2021年10~12月,分别在漓江的上、中、下游选取人为干扰较小的典型喀斯特地貌森林分布区,建立了15块20 m×20 m典型森林样地,上、中、下游的样地数量分别为:4、6和5块(图1). 通过每木检尺获得各样地的树高、胸径和优势树种等信息. 在每个样地的采样点挖取4个宽度为0.5~0.8 m,深度为0.4 m的土壤剖面. 由于流域喀斯特地貌的特殊性,土壤存量少,通常在岩石表面和岩石之间的缝隙中,40 cm以下土样很难获取^[19,22,24],本研究按0~20 cm和20~40 cm两个层次采集土壤样品,并用环刀取每层土壤用于测定土壤容重,共取得样品数128个. 土壤样品预处理后,用于土壤理化指标、有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳和微生物碳含量的测定. 样地基本情况见表1.

1.2.2 土壤样品的测定

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾-外加热法测定其有机碳含量^[25]. 可溶性有机碳(DOC)采用TOC分析仪(岛津 TOC-LCPH200,日本岛津公司)测定^[26]. 微生物碳(MBC)采用氯仿熏蒸-浸提法测定^[27]. 易氧化有机碳(ROC)采用KMnO₄氧化-紫外分光光度法测

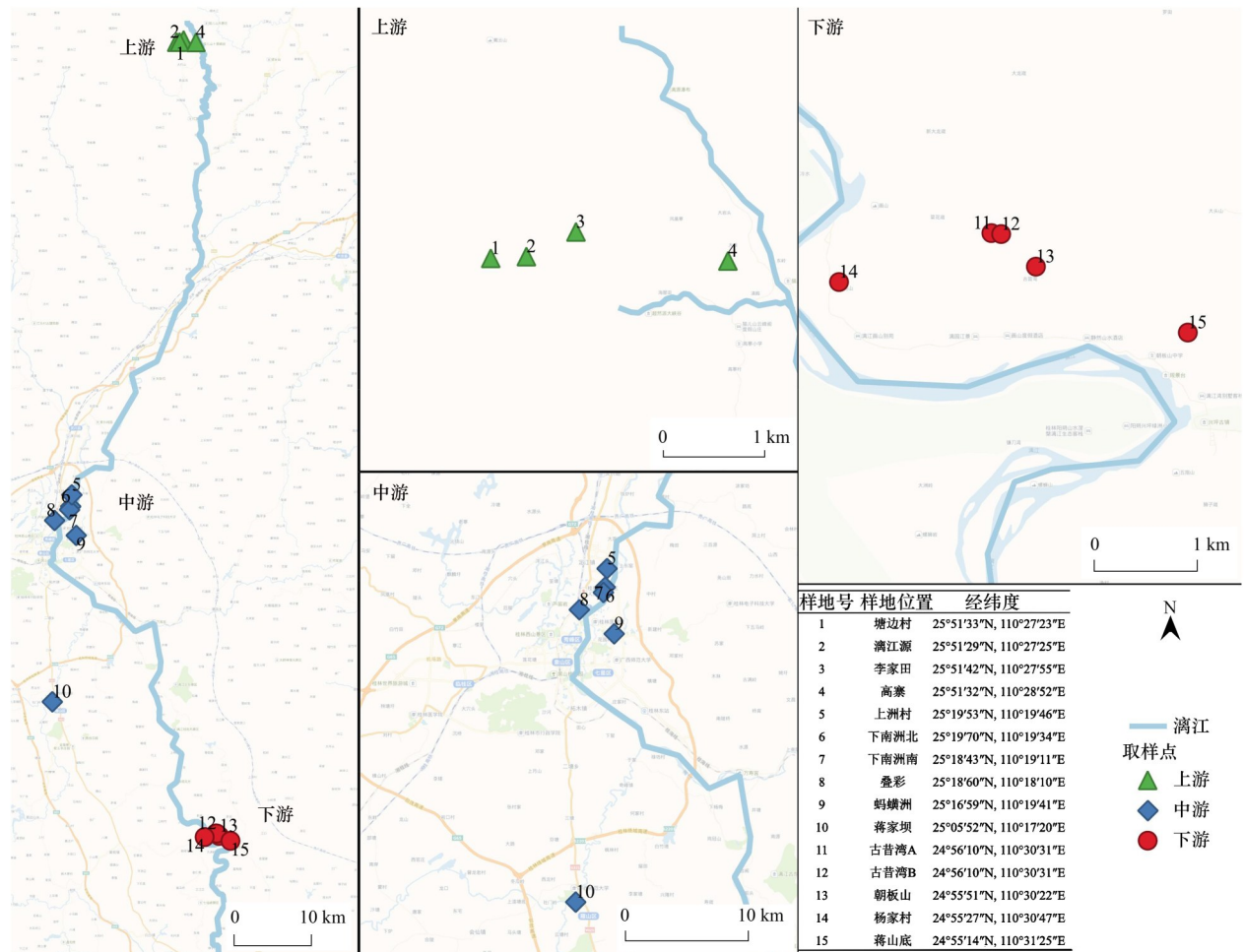


图 1 漓江流域采样点分布示意
Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Lijiang River Basin

定^[9]。土壤其他理化因子的测定方法均参考《土壤农化分析(第三版)》^[25]:土壤总氮采用凯氏定氮法;土壤总磷采用钼锑抗比色法;土壤含水量采用烘干法;土壤容重采用环刀法。

1.2.3 土壤有机碳密度

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量,排除了面积因素的影响以土体体积为基础来计算,是评价土壤有机碳储量的一个重要指标^[28]。

某一土层*i*的有机碳密度SOC_{*i*}(kg·m⁻²)计算公式如下:

$$SOC_i = C_i D_i E_i \tag{1}$$

如果某一土体的剖面由*k*层组成,那么该剖面的有机碳密度SOC_D的计算公式为:

$$SOC_D = \sum_{i=1}^k SOC_i = \sum_{i=1}^k C_i D_i E_i \tag{2}$$

式中,*C_i*为土壤有机碳含量(g·kg⁻¹);*D_i*为容重(g·cm⁻³);*E_i*为土层厚度(m)。

1.3 数据处理方法

数据统计通过R语言 4.1.3 软件实现。漓江上、

中、下游不同流域段森林土壤有机碳及其活性组分的含量的均值比较采用 agricolae 包进行 LSD 检验。采用单因素方差分析(ANOVA)对不同土层流域森林土壤有机碳及其活性组分含量进行差异性检验。使用 corplot 包检验土壤有机碳及其活性组分与土壤其他因子关系的显著性。使用 vegan 包进行冗余分析。ggplot2 包实现数据可视化。

将影响土壤有机碳分布格局的因子分为样地海拔、物种多样性(物种丰富度、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数)、土壤理化因子(总氮、总磷、含水量、容重和 pH)和土壤有机碳活性组分(微生物碳、可溶性有机碳和易氧化有机碳)。引入分段结构方程模型,探究各变量间的直接和间接关系,获取各类影响因子对土壤有机碳分布的影响途径,量化各类驱动土壤有机碳分布的驱动因子的作用贡献。主要用到的 R 数据包有:piecewiseSEM、nlme 和 lme4。采用 Fisher's C 对建模结果的优度进行检验。根据显著性(*P* < 0.05)和模型优度(0 ≤ Fisher's C/df ≤ 2 和 0.05 < *P* ≤ 1)对模型进行进一步修正。

表 1 各样地概况
Table 1 Sample site overview

流域	样地号	海拔/m	$\omega(\text{TP})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TN})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH	含水量 / $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	容重 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	物种数 /种	优势树种
上游	1	320	2.96 ± 0.715	3.99 ± 0.938	5.06 ± 0.581	0.25 ± 0.116	0.79 ± 0.119	62	垂叶榕(<i>Ficus benjamina</i> L.)
	2	160	3.40 ± 0.201	4.35 ± 1.249	5.805 ± 0.466	0.24 ± 0.026	0.74 ± 0.024	37	润楠[<i>Machilus nanmu</i> (Oliver) Hemsley] 和木莓(<i>Rubus swinhoei</i> Hance)
	3	160	4.12 ± 0.360	4.05 ± 0.748	6.23 ± 0.492	0.31 ± 0.024	0.73 ± 0.097	61	芬芳安息香(<i>Styrax odoratissimus</i> Champ.)
	4	160	2.77 ± 0.373	1.50 ± 0.472	5.77 ± 0.581	0.29 ± 0.021	1.21 ± 0.011	19	杉木[<i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.]和缺萼枫香(<i>Liquidambar acalycina</i> Chang)
中游	5	160	1.63 ± 0.386	1.05 ± 0.423	5.78 ± 0.356	0.16 ± 0.029	1.12 ± 0.146	30	润楠(<i>Machilus nanmu</i> (Oliver) Hemsley)
	6	160	1.43 ± 0.219	0.96 ± 0.215	6.07 ± 0.402	0.16 ± 0.029	1.09 ± 0.114	14	牛耳枫(<i>Daphniphyllum calycinum</i> Benth.) 和朴树(<i>Celtis sinensis</i> Pers.)
	7	540	1.70 ± 0.295	0.85 ± 0.390	5.90 ± 0.423	0.17 ± 0.086	1.12 ± 0.061	9	构树(<i>Broussonetia papyrifera</i>) 和川桂(<i>Cinnamomum wilsonii</i> Gamble)
	8	660	1.83 ± 0.523	0.97 ± 0.534	4.88 ± 0.332	0.11 ± 0.058	1.25 ± 0.199	12	毛桂(<i>Cinnamomum appelianum</i> Schewe)
	9	400	1.83 ± 0.395	0.89 ± 0.322	5.15 ± 0.594	0.17 ± 0.035	1.19 ± 0.123	14	朴树(<i>Celtis sinensis</i> Pers.)
	10	150	1.57 ± 0.337	0.69 ± 0.202	5.26 ± 0.516	0.11 ± 0.033	1.14 ± 0.087	30	盐麸木(<i>Rhus chinensis</i> Mill.)、苦槠[<i>Castanopsis sclerophylla</i> (Lindl.) Schott.]
下游	11	150	3.40 ± 0.639	3.08 ± 0.922	6.12 ± 0.617	0.24 ± 0.031	0.89 ± 0.054	25	榿木[<i>Loropetalum chinense</i> (R. Br.) Oliver]和光皮桉木(<i>Cornus wilsoniana</i> Wangerin)
	12	150	3.03 ± 0.369	2.77 ± 0.699	6.44 ± 0.473	0.28 ± 0.026	0.86 ± 0.069	33	光皮桉木(<i>Cornus wilsoniana</i> Wangerin)
	13	130	1.17 ± 0.149	0.73 ± 0.135	5.72 ± 0.553	0.19 ± 0.012	1.30 ± 0.105	29	榿木[<i>Loropetalum chinense</i> (R. Br.) Oliver]
	14	150	2.95 ± 0.379	2.69 ± 0.507	6.37 ± 0.327	0.24 ± 0.033	0.90 ± 0.082	31	榿木[<i>Loropetalum chinense</i> (R. Br.) Oliver]和青冈[<i>Cyclobalanopsis glauca</i> (Thunberg) Oersted]
	15	150	4.18 ± 1.551	6.36 ± 2.843	4.82 ± 0.654	0.25 ± 0.056	0.62 ± 0.126	22	榿木[<i>Loropetalum chinense</i> (R. Br.) Oliver]和粗糠柴(<i>Mallotus philippensis</i>)

2 结果与分析

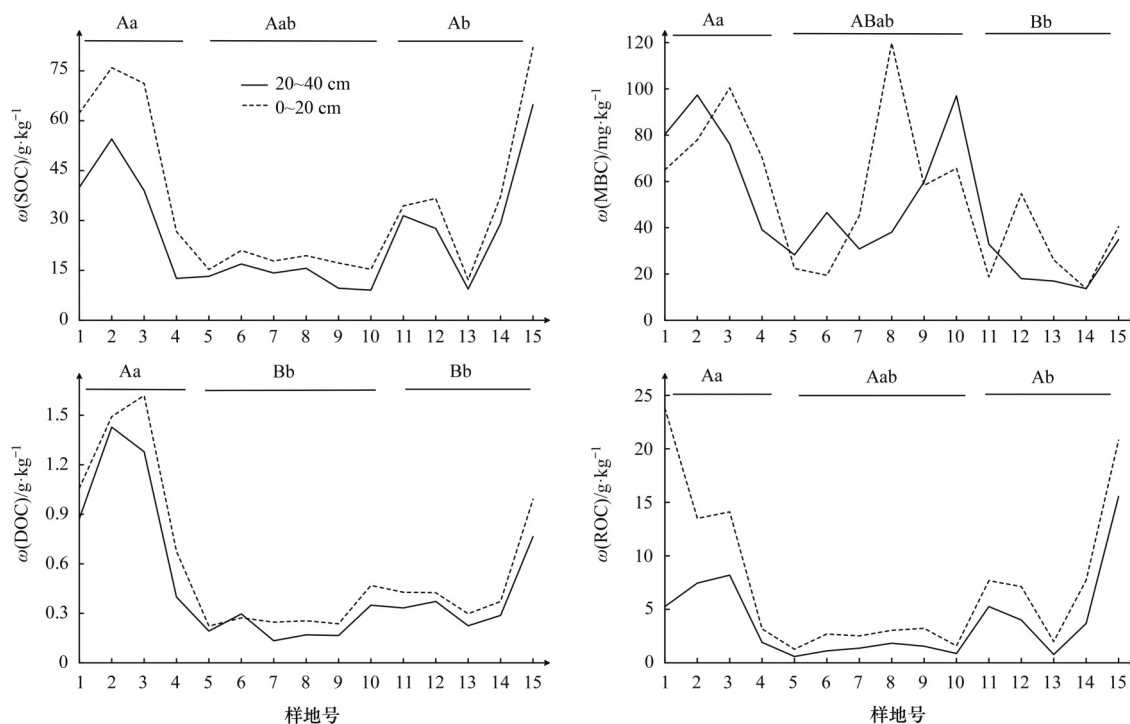
2.1 流域喀斯特森林土壤SOC及其活性组分空间分布特征分析

漓江流域喀斯特森林单位体积土壤有机碳及其活性组分含量存在差异(图2)。森林土壤SOC、DOC和ROC的含量呈现上游>下游>中游的规律,而土壤MBC的含量规律表现为:上游>中游>下游。在0~20 cm土层,土壤有机碳及其活性组分在上游和下游的含量差异显著($P < 0.05$),土壤SOC、MBC和ROC的含量在上游和中游、中游和下游之间均无显著性差异,DOC的含量在中游和下游之间无显著性差异。在20~40 cm土层,土壤SOC和ROC的含量在上、中、下游之间均无显著性差异,MBC在上游和下游的含量差异显著($P < 0.05$),DOC的含量在上游与中游和下游之间差异显著($P < 0.05$)。

漓江流域喀斯特森林不同土层深度土壤有机碳及其活性组分含量如图3所示。0~40 cm土层,土壤 $\omega(\text{SOC})$ 、 $\omega(\text{MBC})$ 、 $\omega(\text{DOC})$ 和 $\omega(\text{ROC})$ 变化范围分别是:4.58~125.65 g·kg⁻¹、2.13~203.39 mg·kg⁻¹、

0.096~1.88 g·kg⁻¹和0.12~45.45 g·kg⁻¹。漓江流域土壤SOC、DOC和ROC的含量在不同土层均呈现上游>下游>中游的规律,而土壤MBC的含量在不同土层的规律表现为:上游>中游>下游。在不同流域段,土壤SOC、DOC和ROC均表现为:浅层(0~20 cm)>深层(20~40 cm)。不同土层的土壤SOC含量在上游和中游的差异显著,不同土层的DOC含量在中游差异显著,不同土层的ROC含量在中游和下游差异显著。MBC含量在不同流域段的不同土层间差异均不显著。

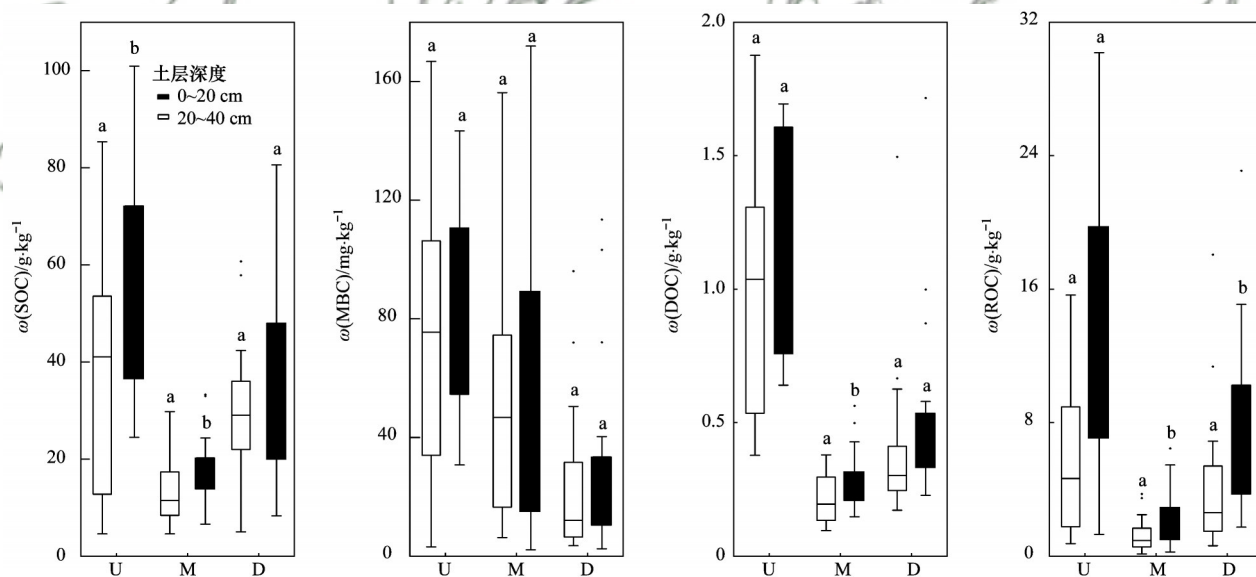
综合分析漓江流域喀斯特森林不同深度土层的有机碳及其组分变异性发现(表2):ROC的变异系数大于1,离散性较大,其余指标变异系数均在0.11~0.91之间,为中等变异。其中,土壤SOC、DOC和ROC均是0~20 cm土层的变异系数小于20~40 cm。只有MBC的变异系数是0~20 cm大于20~40 cm。土壤SOC在上、中、下流域段的空间分布均呈现0~20 cm>20~40 cm的规律(图3),并且变异系数也是0~20 cm>20~40 cm(表2),印证了土壤SOC在表层聚集。



不同大写字母表示各指标在 20~40 cm 土层不同流域段含量在 0.05 水平上差异显著;
不同小写字母表示各指标在 0~20 cm 土层不同流域段含量在 0.05 水平上差异显著

图 2 各样地土壤有机碳及其活性组分含量沿漓江流域分布

Fig. 2 Distribution of soil organic carbon and its active fraction content along the Lijiang River Basin in each sample site



U 表示上游, M 表示中游, D 表示下游; 不同小写字母表示同一指标、同一流域段各土层深度在 0.05 水平上差异显著

图 3 漓江不同流域段森林土壤不同深度有机碳及其活性组分含量

Fig. 3 Organic carbon and its active fraction content at different depths in forest soils in different watershed sections of the Lijiang River Basin

漓江流域喀斯特森林 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤有机碳密度均呈现上游 > 下游 > 中游的规律 (图 4). 流域土壤有机碳密度整体呈现 0~20 cm > 20~40 cm 的规律. 在漓江上游和中游森林样地中, 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层土壤有机碳密度之间有显著差异 ($P < 0.01$). 而在下游, 不同土层间土壤有机碳密度无显著性差异.

2.2 流域喀斯特森林土壤 SOC 及其活性组分分布的驱动因子分析

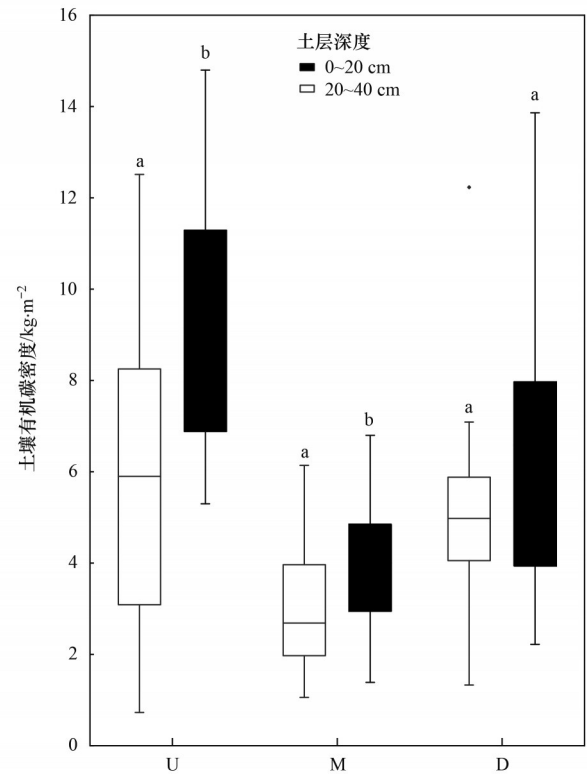
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳及其活性组分与各类驱动因子间的相关性分析如表 3 所示. 土壤 SOC、DOC 和 ROC 两两之间均极显著正相关 ($P < 0.001$). MBC 与 SOC 和 ROC 之间呈显著正相关 ($P < 0.05$).

表 2 不同深度土壤有机碳及其活性组分含量变异系数¹⁾

Table 2 Coefficient of variation in soil organic carbon and its active fraction content at different depths

指标	土壤深度/cm	平均值	标准差	变异系数
SOC	0~20	36.31	26.19	0.72
	20~40	25.87	21.12	0.82
MBC	0~20	53.20	46.70	0.88
	20~40	47.32	41.23	0.87
DOC	0~20	0.60	0.48	0.79
	20~40	0.48	0.43	0.89
ROC	0~20	7.62	8.69	1.14
	20~40	3.96	6.04	1.53

1) SOC、DOC 和 ROC 平均值的单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, MBC 平均值的单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 标准差和变异系数无量纲



U 表示上游, M 表示中游, D 表示下游; 不同小写字母表示同一流域段各土层间在 0.05 水平上差异显著

图 4 漓江不同流域段土壤有机碳密度

Fig. 4 Soil organic carbon density in different watershed sections of Lijiang River

土壤有机碳及其活性组分含量与各驱动因子之间的关系存在差异, 相关关系检测结果如下(表 3): 土壤 SOC 与土壤容重(BD)和样地海拔(ASL)显著负相关, 与土壤总氮(TN)、总磷(TP)、含水量(SWC)、样地物种丰富度(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Simpson 多样性指数(D)均显著正相关. 其活性组分中 MBC 仅与 TP 和 R 显著正相关, 与 pH 显著负相关, 与其他检测因子之间相关关系不显著; DOC 与 TN、TP、SWC、BD 和 R 均呈现极显著的相关关系, 其中与 BD 极显著负相关, 与 ASL 呈显著的负相关; 除了 ASL 和土壤 pH 外, ROC 与其他因子均有显著相关

性, 其中与 BD 呈极显著的负相关关系, 相关性系数为-0.592.

2.3 流域喀斯特森林土壤 SOC 空间分布驱动因子的作用分析

分别在上游、中游、下游及全流域构建分段结构方程模型, 进一步分析各类因子对漓江流域喀斯特森林土壤有机碳分布的驱动作用途径和相对大小, 检验结果显示(图 5): 上游、中游和全流域的模型拟合效果较好($0 \leq \text{Fisher's } C/\text{df} \leq 2$ 和 $0.05 < P \leq 1$), 对土壤 SOC 的解释率分别为 66%、36% 和 82%. 在上游, 土壤有机碳活性组分是土壤有机碳空间分布的主要驱动因子, 能直接作用于土壤有机碳的分布且影响达到极显著水平($P < 0.001$), D 是上游土壤 SOC 含量变化的重要预测因子. 在中游, 土壤理化因子是土壤 SOC 空间分布的主要驱动因子, 能通过直接和间接作用影响土壤 SOC 的分布, 其中土壤 TN 是最重要的预测因子. 在下游, 结构方程模型拟合效果较差.

在全流域尺度上(图 5 和表 4), 土壤理化因子是土壤 SOC 空间分布的主要驱动因子, 能直接作用于土壤 SOC 的分布且影响极显著($P < 0.001$), 还能通过显著影响土壤有机碳活性组分间接作用于土壤 SOC 的分布, 其对土壤 SOC 的总效应达到 1.148; 土壤有机碳活性组分是土壤 SOC 分布的次要驱动因子, 直接极显著地作用于土壤 SOC 的分布($P < 0.001$), 其对土壤 SOC 的总效应为 0.574; ASL 对土壤 SOC 无直接影响, 通过作用于土壤理化因子、样地物种多样性和土壤有机碳活性组分, 间接作用于土壤 SOC 的空间分布, 其对土壤 SOC 的总效应为 0.284; 样地物种多样性对土壤 SOC 含量有直接的负向影响, 主要通过土壤理化因子和土壤有机碳活性组分间接作用于土壤 SOC 分布, 其对土壤 SOC 的总效应为-0.013.

通过计算全流域各驱动因子的直接和间接标准化效应, 以量化并评估其影响漓江流域喀斯特森林土壤 SOC 的作用大小(表 4). 其中, 各驱动因子对土壤 SOC 直接作用从大到小排序为: $\text{TN} > \text{ROC} > \text{DOC} > \text{TP} > \text{R} > \text{H}' > \text{MBC} > \text{pH} > \text{D} > \text{SWC} > \text{BD}$. 各驱动因子对土壤有机碳间接作用从大到小排序为: $\text{TN} > \text{R} > \text{H}' > \text{ASL} > \text{TP} > \text{D} > \text{BD} > \text{pH} > \text{SWC}$. 其中, 土壤 MBC、DOC 和 ROC 对土壤 SOC 仅有直接作用, ASL 对土壤 SOC 仅有间接作用. 各驱动因子中, 对土壤 SOC 有极显著影响($P < 0.001$)的因子有(图 5 和表 4): TN、ROC、R 和 DOC, 均为漓江流域喀斯特森林土壤 SOC 含量变化的重要预测因子.

RDA 排序图显示(图 6): 土壤 SOC 和 ROC 主要分

表 3 土壤有机碳及其活性组分与其驱动因子相关性¹⁾
Table 3 Correlation of soil organic carbon and its active fraction with its drivers

	SOC	MBC	DOC	ROC	TN	TP	SWC
SOC	1						
MBC	0.234*	1					
DOC	0.805***	0.383***	1				
ROC	0.830***	0.182*	0.685***	1			
TN	0.936***	0.170	0.774***	0.863***	1		
TP	0.801***	0.207*	0.726***	0.708***	0.887***	1	
SWC	0.414***	0.055	0.419***	0.223*	0.439***	0.516***	1
BD	-0.746***	-0.095	-0.656***	-0.592***	-0.787***	-0.728***	-0.577***
pH	-0.100	-0.226*	-0.043	-0.162	-0.124	0.028	0.210*
R	0.442***	0.230*	0.674***	0.385***	0.433***	0.412***	0.383***
H'	0.282**	-0.178	-0.046	0.258**	0.396***	0.353***	0.199*
D	0.261**	-0.124	-0.049	0.256**	0.370***	0.305***	0.102
ASL	-0.228*	0.160	-0.278**	-0.137	-0.282**	-0.280**	-0.374***
	BD	pH	R	H'	D	ASL	
BD	1						
pH	-0.101***	1					
R	-0.492***	0.053	1				
H'	-0.368**	-0.041	-0.186	1			
D	-0.273**	-0.212*	-0.196	0.934***	1		
ASL	0.328***	-0.326***	-0.350***	-0.124	0.016	1	

1) *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$

布在第二象限, DOC 和 MBC 主要分布在第三象限. TN、 H' 和 D 是影响土壤 SOC 和 ROC 的主要环境因子, R 、TP 和 SWC 是影响 ROC 和 MBC 分布的主要环境因子. 土壤有机碳及其活性组分含量和各驱动因子中 TN、TP、 H' 和 R 的连线较长, 且和土壤 SOC、ROC、DOC 和 MBC 含量的夹角余弦值较大, 说明这 4 种理化因子与土壤有机碳组分含量相关系数较大且呈正相关.

3 讨论

3.1 漓江流域喀斯特森林土壤 SOC 及其活性组分分布格局成因

漓江流域的森林受到喀斯特地貌以及自然因素和人类活动等因素的综合影响, 其土壤 SOC 的空间分布格局具有明显的地域性特征. 流域自上而下纬度降低, 其沿岸喀斯特森林土壤 SOC 含量随流域段发生变化为: 上游 > 下游 > 中游, 可能与漓江流域各段的受保护和人为干扰程度有关. 漓江源头为猫儿山国家级自然保护区, 为主要的水源涵养森林, 人为干扰较少, 因此上游森林土壤 SOC 含量最高. 中游段贯穿桂林市, 人为活动对流域森林的干扰较大, 其森林土壤 SOC 含量显著低于上游, 甚至低于纬度更低的下游段. 下游贯穿风景区和经济作物耕种区, 旅游和耕种活动会对森林生态系统产生干扰, 使土壤

SOC 含量增加^[29]. 因此, 为了有效提升漓江流域喀斯特森林的碳汇功能, 需要建立覆盖全流域的生态保护机制, 严格控制人为干扰.

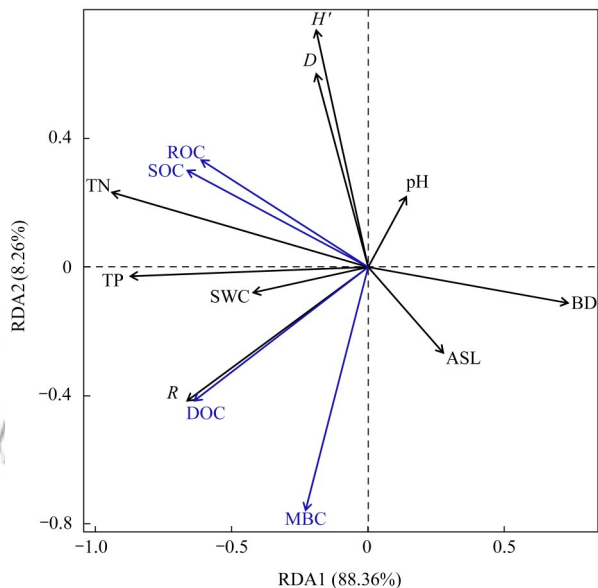
漓江流域喀斯特森林土壤 SOC 具有表聚性, 这与已有研究的结果一致^[30,31]. 在典型喀斯特森林中, 土层浅薄、土壤剖面形态和理化性质都有别于同纬度地带性土壤^[32], 地下多有坚硬的岩石, 在植物生长过程中其根系会避开岩石生长, 约 90% 的植物根系分布在 0 ~ 20 cm 土层中, 植物根系分泌的有机物输入土壤, 土壤 SOC 含量随土层深度的增加而急剧下降^[24]. 森林土壤 SOC 还与土壤表层凋落成分的物迁移转化密切相关^[5,33]. 对喀斯特地区坡地、天坑和洼地的研究均发现了土壤表层 SOC 含量最大, 底层 SOC 含量最小, 且喀斯特地区土壤表层 SOC 含量高于非喀斯特地区^[21,34].

3.2 漓江流域喀斯特森林与其他森林土壤 SOC 空间分布差异

土壤 SOC 的差异和区域的气候、植被条件和土地植被覆盖类型等密切相关. 漓江流域地处亚热带区域, 森林物种多样性丰富, 其土壤 $\omega(\text{SOC})$ (4.58 ~ 125.65 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 高于内蒙古辉河流域 (0.99 ~ 99.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[35]. 漓江流域土壤 SOC_D (3.62 ~ 27.31 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) 也明显大于气候寒冷干燥、植被类型以高寒草甸为主的长江源区的布曲流域 (最大值为 3.17

表 4 全流域各驱动因子对土壤有机碳的直接和间接影响及各类驱动因子对土壤有机碳的总效应排序
Table 4 Direct and indirect effects of various drivers on soil organic carbon and ranking of the total effect of various drivers on soil organic carbon across the basin

驱动因子类型	驱动因子			总效应	排序
	名称	直接影响	间接影响		
土壤理化因子	TN	0.479	0.600	1.148	1
	TP	-0.075	-0.094		
	SWC	0.004	0.011		
	BD	-0.004	-0.076		
	pH	-0.018	0.022		
土壤有机碳活性组分	MBC	-0.023	0	0.574	2
	DOC	0.264	0		
	ROC	0.298	0		
样地海拔	ASL	0	-0.200	0.284	3
样地物种多样性	<i>R</i>	-0.065	0.575	-0.013	4
	<i>H'</i>	-0.039	0.349		
	<i>D</i>	-0.009	0.079		



蓝线表示：土壤有机碳及其活性组分；黑线表示：驱动因子
图 6 全流域土壤有机碳及其活性组分与其他驱动因子相关性的 RDA 排序

Fig. 6 RDA ranking diagram of the correlation between soil organic carbon and its active fraction with other drivers across the basin

$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)^[36]. 漓江流域森林土壤 SOCD 平均值为 $10.70\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 略大于桂林市林地土壤 SOCD ($9.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)^[37]. 此外, 漓江流域喀斯特森林土壤 SOC 与其他喀斯特地貌的也存在差异, 变异系数较大, 相比于桂林会仙喀斯特湿地土壤 SOC 含量较高^[29], 说明喀斯特森林土壤的碳储功能较湿地强. 而贵州省后寨河流域(属高原型喀斯特小流域) $0\sim 40\text{ cm}$ 的土壤 $\omega(\text{SOC})$ ($0.13\sim 128.74\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 沿流域跨度更大^[22], 也说明喀斯特地区土壤空间异质性强.

3.3 漓江流域喀斯特森林土壤 SOC 空间分布的驱动因子及作用差异

土壤 SOC 与其活性组分间依赖性强, 各活性组

分的变化能灵敏地反映土壤 SOC 的变化. 土壤有机碳活性组分较敏感, 在土壤中移动速度快, 可较快地反映土壤 SOC 的变化情况^[29]. 从漓江全流域观察, 各活性组分所占土壤 SOC 的比例不同, 在不同土层所表现出的差异性也有所不同, 但对土壤 SOC 的空间分布有极显著的正向作用(图 5), 是因为在土壤剖面中 3 种活性有机碳组分的形成、分解和迁移所受土壤内外环境的影响不同. 这也说明活性组分来源于土壤 SOC, 土壤 SOC 及其活性组分之间相互依赖和相互转化^[38-40]. ROC 受到外界环境干扰容易被氧化分解为其他活性组分, 土壤 DOC 在不同土层间迁移能力较强, 容易被土壤微生物利用, 进而增加土壤 MBC 含量^[41]. 此外, 土壤 SOC 及其活性组分的空间分布还受限于各类环境因素^[42].

漓江流域喀斯特森林土壤 SOC 空间分布受到各类生物和非生物因素的综合影响. 由于样地海拔、植被类型和土壤条件等存在差异, 不同流域段影响土壤 SOC 空间分布的驱动因子存在差异, 各类驱动因子对土壤 SOC 的作用途径和贡献不同. 综合观测漓江流域喀斯特森林土壤理化因子对土壤 SOC 的作用最大, 有直接和间接两种途径, 其中 TN 是最重要的预测因子, 主要通过直接作用影响土壤 SOC 的空间分布(图 5 和表 4). 土壤有机碳活性组分对其有机碳作用次之, 为直接作用, 其中 ROC 是最重要的预测因子. 样地物种多样性对土壤 SOC 的直接作用不显著, 主要是间接作用, 其中 *R* 是最重要的预测因子. 植被凋落物、土壤有机质矿化等各种因素会导致土壤理化性质的变化^[43,44]. 因此, 可以通过提升该区域的森林土壤理化性质及其活性组分的含量, 达到提升区域森林土壤碳汇功能的目的. ASL 变化会引起气候、植被覆盖和微生物多样性的变化从而间接影

响土壤 SOC 的空间分布^[45]。而 ASL 是通过生物因素(物种多样性)和土壤理化因子作为桥梁,从而关联作用到土壤 SOC 的分布。生物因素和土壤理化因子之所以能成为桥梁,是基于其对土壤 SOC 及其营养元素的输入功能,物种多样性越高的森林其土壤 SOC 储量也相对较高^[15]。土壤中的碳氮磷等元素主要来源于地表的凋落物,而植被多样性和覆盖度决定了地表凋落物的成分^[18]。植物根系也给土壤输入有机物,氮和磷的增加可以增加根系生物量和分泌物的种类和数量,显著促进森林生态系统土壤 SOC 积累^[20,42]。因此,加大区域森林生态系统的物种多样性保护工作的力度,也是提升区域森林生态系统的碳汇功能的有效途径。

4 结论

(1) 漓江流域喀斯特森林土壤 SOC 含量分布为:上游 > 下游 > 中游,其活性组分 ROC 和 DOC 的含量分布为:上游 > 下游 > 中游,而 MBC 含量的分布规律为:上游 > 中游 > 下游。在 0~40 cm 土层,土壤有机碳及其活性组分含量具有表聚特征。

(2) 漓江流域喀斯特森林土壤 SOC 及其组分之间显著正相关,土壤 SOC 及其活性组分含量与各驱动因子之间的关系存在差异。

(3) 各类驱动因子对流域喀斯特森林土壤 SOC 的空间分布的驱动作用途径和贡献不同。其贡献大小表现为:土壤理化因子 > 土壤有机碳活性组分 > 样地海拔 > 样地物种多样性,总效应分别为:1.148、0.574、0.284 和 -0.013。TN、ROC、R 和 DOC 是漓江流域喀斯特森林土壤 SOC 空间分布的重要预测因子。

参考文献:

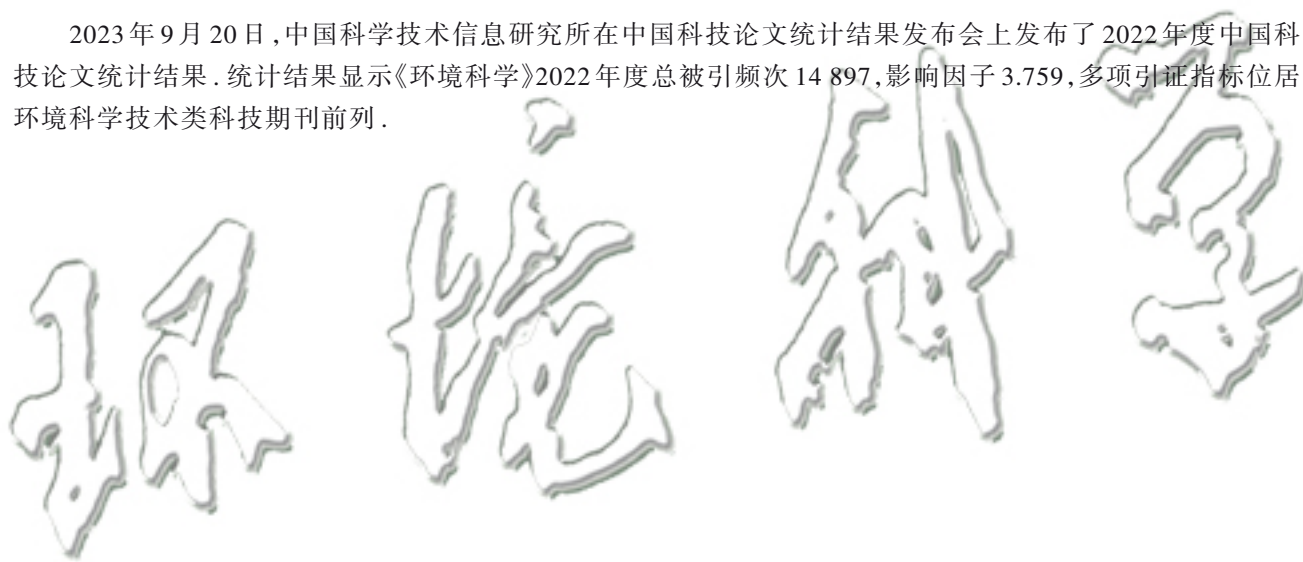
- [1] 胡雪寒, 刘娟, 姜培坤, 等. 亚热带森林转换对不同粒径土壤有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2018, **55**(6): 1485-1493.
- Hu X H, Liu J, Jiang P K, et al. Effects of change in forest type on soil organic carbon in soil particles relative to size in Subtropical China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(6): 1485-1493.
- [2] 周广胜, 周梦子, 周莉, 等. 中国陆地生态系统增汇潜力研究展望[J]. 科学通报, 2022, **67**(31): 3625-3632.
- Zhou G S, Zhou M Z, Zhou L, et al. Advances in the carbon sink potential of terrestrial ecosystems in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, **67**(31): 3625-3632.
- [3] Zhang Z Y, Zha T G, Yu Y, et al. Evaluating indices of soil organic carbon stability. A case study for forest restoration projects near Beijing, China[J]. Ecological Indicators, 2022, **142**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109222.
- [4] Brunn M, Krüger J, Lang F. Experimental drought increased the belowground sink strength towards higher topsoil organic carbon stocks in a temperate mature forest[J]. Geoderma, 2023, **431**, doi: 10.1016/j.geoderma.2023.116356.
- [5] Li H W, Wu Y P, Liu S G, et al. Decipher soil organic carbon dynamics and driving forces across China using machine learning[J]. Global Change Biology, 2022, **28**(10): 3394-3410.
- [6] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, **51**(5): 1173-1179.
- [7] Li S, Zhang S R, Pu Y L, et al. Dynamics of soil labile organic carbon fractions and C-cycle enzyme activities under straw mulch in Chengdu Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016, **155**: 289-297.
- [8] Haynes R J. Labile Organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview[J]. Advances in Agronomy, 2005, **85**: 221-268.
- [9] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, **46**(7): 1459-1466.
- [10] 王春燕, 何念鹏, 吕瑜良. 中国东部森林土壤有机碳组分的纬度格局及其影响因子[J]. 生态学报, 2016, **36**(11): 3176-3188.
- Wang C Y, He N P, Lyu Y L. Latitudinal patterns and factors affecting different soil organic carbon fractions in the eastern forests of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(11): 3176-3188.
- [11] 杨静, 张耀艺, 谭思懿, 等. 中亚热带不同树种对土壤团聚体组成及其碳、氮含量的影响[J]. 林业科学, 2022, **58**(4): 51-61.
- Yang J, Zhang Y Y, Tan S Y, et al. Effects of different tree species on the compositions of soil aggregates and their carbon and nitrogen concentrations in Mid-Subtropical Forests[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, **58**(4): 51-61.
- [12] De Vos B, Cools N, Ilvesniemi H, et al. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey[J]. Geoderma, 2015, **251-252**: 33-46.
- [13] Lal R. Forest soils and carbon sequestration[J]. Forest Ecology and Management, 2005, **220**(1-3): 242-258.
- [14] Yang Y H, Chen Y N, Li W H, et al. Distribution of soil organic carbon under different vegetation zones in the Ili River Valley, Xinjiang[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, **20**(5): 729-740.
- [15] 胡宗达, 刘世荣, 刘兴良, 等. 川西亚高山 3 种天然次生林土壤有机碳氮组分特征[J]. 林业科学, 2020, **56**(11): 1-11.
- Hu Z D, Liu S R, Liu X L, et al. Characterization of soil organic carbon and nitrogen components in three natural secondary forests in subalpine regions of western Sichuan, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, **56**(11): 1-11.
- [16] 卫玮, 党坤良. 秦岭南坡林地土壤有机碳密度空间分异特征[J]. 林业科学, 2019, **55**(5): 11-19.
- Wei W, Dang X L. Spatial Variation of the density of soil organic carbon in forest land on the southern slope of Qinling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, **55**(5): 11-19.
- [17] Chen S P, Wang W T, Xu W T, et al. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, **115**(16): 4027-4032.
- [18] Li Y, Xiong K N, Liu Z Q, et al. Distribution and influencing factors of soil organic carbon in a typical karst catchment undergoing natural restoration[J]. CATENA, 2022, **212**, doi: 10.1016/j.catena.2022.106078.
- [19] Qin Y B, Xin Z B, Wang D M, et al. Soil organic carbon storage and its influencing factors in the riparian woodlands of a Chinese karst area[J]. CATENA, 2017, **153**: 21-29.

- [20] Zhu X A, Zou X, Lu E F, *et al.* Litterfall biomass and nutrient cycling in karst and nearby non-karst forests in tropical China: a 10-year comparison[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 758, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143619.
- [21] 张勇, 史学正, 赵永存, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2314-2319.
Zhang Y, Shi X Z, Zhao Y C, *et al.* Estimates and affecting factors of soil organic carbon storages in Yunnan-Guizhou-Guangxi region of China [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(8): 2314-2319.
- [22] 张珍明, 周运超, 田潇, 等. 喀斯特小流域土壤有机碳空间异质性及储量估算方法[J]. *生态学报*, 2017, **37**(22): 7647-7659.
Zhang Z M, Zhou Y C, Tian X, *et al.* Study on spatial heterogeneity and reserve estimation of soil organic carbon in a small karst catchment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(22): 7647-7659.
- [23] 王霖娇, 李瑞, 盛茂银. 典型喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳时空分布格局及其与环境的相关性[J]. *生态学报*, 2017, **37**(5): 1367-1378.
Wang L J, Li R, Sheng M Y. Distribution of soil organic carbon related to environmental factors in typical rocky desertification ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(5): 1367-1378.
- [24] Ni J, Luo D H, Xia J, *et al.* Vegetation in karst terrain of southwestern China allocates more biomass to roots [J]. *Solid Earth*, 2015, **6**(3): 799-810.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [26] 丁咸庆, 柏菁, 项文化, 等. 不同浸提剂处理森林土壤溶解性有机碳含量比较[J]. *土壤*, 2020, **52**(3): 518-524.
Ding X Q, Bai J, Xiang W H, *et al.* Comparison of dissolved organic carbon contents in forest soils extracted by different agents [J]. *Soils*, 2020, **52**(3): 518-524.
- [27] Jenkinson D S, Brookes P C, Powlson D S. Measuring soil microbial biomass [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(1): 5-7.
- [28] Köchy M, Hiederer R, Freibauer A. Global distribution of soil organic carbon-Part 1: masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world [J]. *Soil*, 2015, **1**(1): 351-365.
- [29] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 等. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1491-1503.
Xu G P, Li Y Q, Shen Y Y, *et al.* Soil organic carbon distribution and components in different plant communities along a water table gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1491-1503.
- [30] 黄小清, 全川, 罗敏, 等. 九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 2226-2236.
Huang X Q, Tong C, Luo M, *et al.* Soil organic carbon storage, active component contents, and stability along a flooding gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2226-2236.
- [31] 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 等. 重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3348-3356.
Liao Y Q, Long J, Mu Z J, *et al.* Spatial characterization of stable isotope composition of organic carbon from farmland soils in Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3348-3356.
- [32] 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 等. 喀斯特典型生态系统土壤有机碳积累特征与稳定机制[J]. *农业现代化研究*, 2018, **39**(6): 907-915.
Chen X B, He X Y, Hu Y J, *et al.* Characteristics and mechanisms of soil organic carbon accumulation and stability in typical karst ecosystems [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, **39**(6): 907-915.
- [33] 邓小军, 朱柳霏, 宋贤冲, 等. 猫儿山自然保护区不同林分类型土壤生态化学计量特征[J]. *土壤通报*, 2022, **53**(2): 366-373.
Deng X J, Zhu L F, Song X C, *et al.* Soil ecological stoichiometry characteristics of different stand types in Maoershan Nature Reserve [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, **53**(2): 366-373.
- [34] Huang X F, Zhang Z M, Zhou Y C, *et al.* Characteristics of soil organic carbon under different karst landforms [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2021, **36**(3), doi: 10.1007/s13146-021-00711-y.
- [35] 季燕, 靳三玲, 刁兆岩, 等. 2020年7月辉河河岸土壤总有机碳含量的分布特征及其影响因素[J]. *湿地科学*, 2022, **20**(2): 224-231.
Ji Y, Jin S L, Diao Z Y, *et al.* Distribution characteristics of contents of total organic carbon in the soils of Huihe River Bank in July 2020 and their influencing factors [J]. *Wetland Science*, 2022, **20**(2): 224-231.
- [36] 张超飞, 马素萍, 何晓波, 等. 长江源区布曲流域土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *冰川冻土*, 2023, **45**(1): 233-242.
Zhang C F, Ma S P, He X B, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in Buqu Catchment in the source region of the Yangtze River, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, **45**(1): 233-242.
- [37] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(6): 2799-2809.
Zhang K Q, Chen J J, Hou J K, *et al.* Study on sustainable development of carbon storage in Guilin coupled with InVEST and GeoSOS-FLUS model [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2799-2809.
- [38] 董玉清, 官鹏, 卢瑛, 等. 猫儿山不同海拔土壤有机碳组分构成及含量特征[J]. *土壤通报*, 2020, **51**(5): 1142-1151.
Dong Y Q, Guan P, Lu Y, *et al.* Fraction and content of soil organic carbon at different elevations in Maoer Mountain [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, **51**(5): 1142-1151.
- [39] 黄巧义, 林碧珊, 饶国良, 等. 秸秆还田配施石灰对酸性水稻土有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *环境科学*, 2023, **44**(10): 5813-5822.
Huang Q Y, Lin B S, Rao G L, *et al.* Effects of straw returning with lime on SOC and carbon pool management in acidic paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(10): 5813-5822.
- [40] 刘爽, 范峰华, 张昆, 等. 围栏禁牧对滇西北高寒湿地土壤活性有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2023, **43**(4): 1506-1514.
Liu S, Fan F H, Zhang K, *et al.* Effect of fenced grazing on soil active organic carbon in Napahai Wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(4): 1506-1514.
- [41] 马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 等. 不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2715-2723.
Ma X Y, Gong L, Zhu H Q, *et al.* Effects of different carbon inputs on soil stoichiometry in Tianshan Mountains [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2715-2723.
- [42] 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 等. 塔里木盆地北缘绿洲不同连作年

- 限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4639-4647.
- Li X Z, Gong L, Tang J H, *et al.* Characteristics of soil organic carbon components and their correlation with other soil physical and chemical factors in cotton fields with different continuous cropping years in the oasis on the Northern Edge of Tarim Basin [J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4639-4647.
- [43] 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 等. 河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征[J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3353-3363.
- Sun X, Long Y L, Liu L, *et al.* Soil stoichiometry characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye [J]. Environmental Science, 2023, **44**(6): 3353-3363.
- [44] 杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 等. 氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析[J]. 环境科学, 2023, **44**(11): 6226-6234.
- Yang L F, Kong D Y, Diao J W, *et al.* Meta analysis on the effects of nitrogen addition on soil organic carbon content in terrestrial ecosystems [J]. Environmental Science, 2023, **44**(11): 6226-6234.
- [45] 张世航, 陶冶, 陈玉森, 等. 准噶尔荒漠土壤多功能性的空间变异特征及其驱动因素[J]. 生物多样性, 2022, **30**(8): 136-146.
- Zhang S H, Tao Y, Chen Y S, *et al.* Spatial pattern of soil multifunctionality and its correlation with environmental and vegetation factors in the Junggar Desert, China [J]. Biodiversity Science, 2022, **30**(8): 136-146.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2023年9月20日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上发布了2022年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2022年度总被引频次14 897,影响因子3.759,多项引证指标位居环境科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)